



Metodologia per la sperimentazione di un sistema GPS per la localizzazione del treno

Methodology for the experiment of GPS system for train positioning

Prof. Ing. Bruno ANDÓ^(*)
Dott. Ing. Massimiliano CIAFFI^(**)
Dott. Ing. Giusy EMMANUELE^(*)
Dott. Ing. Antonio PISTORIO^(*)
Dott. Ing. Fabio SENESI^(**)

Sommario - L'articolo tratta l'applicazione della tecnologia satellitare in ambiente ferroviario, dove questa potrebbe avere un ruolo strategico per il segnalamento, le comunicazioni, la diagnostica e la sicurezza. L'obiettivo è stato quello di esaminare e valutare le osservazioni satellitari di un GPS a basso costo e confrontarle con i dati del ricevitore RTK ottenuti dai progetti 3InSat⁽¹⁾ ed ERSAT⁽²⁾, dove è stato realizzato in Sardegna il sito di sperimentazione e di validazione, che si basa sulla combinazione della tecnologia ERTMS/ETCS e di quella di localizzazione satellitare, integrate con TLC (cioè GSM-3G, Tetra, Satellite) utilizzanti il protocollo IP. Questi progetti sono stati recentemente avviati da Ansaldo STS, Rete Ferroviaria Italiana (RFI) e l'Università di Catania, al fine di creare un sito di prova e di validazione in Sardegna lungo la linea ferroviaria Cagliari-San Gavino per valutare le criticità applicative delle tecnologie satellitari sulle infrastrutture e sistemi ferroviari. L'accettabilità del lavoro è stata sostenuta dal fatto che la precisione media della localizzazione del treno è sempre stata inferiore ai 3 metri, in linea con gli standard ferroviari⁽³⁾.

Summary - This paper analyses the application of satellite technologies to the railway sector, where such technologies are playing an increasingly important role for signaling, communications, diagnostics and security. The aim of this work has been to examine and evaluate GPS satellite observations in combination with data from a RTK receiver obtained from the projects 3InSat⁽¹⁾ and ERSAT⁽²⁾, a trial and validation test site has been placed in Sardinia, it is based on the combination of the ERTMS / ETCS and the satellite tracking technology, integrated with TLC (i.e. GSM-3G, Tetra, Satellite) systems using the IP protocol. These projects have been recently set up by Ansaldo STS and Rete Ferroviaria Italiana (RFI) and the University of Catania in order to create a trial and validation site in Sardinia – that is located along the railway track 'Cagliari-San Gavino' – for assessing the consequences of satellite-based technologies on the railway infrastructures and systems. The acceptability of the work has been supported by the fact that the average precision position per train trip was always lower than 3 meters in line with railway standards⁽³⁾.

^(*) Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, Università di Catania.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana - Direzione Tecnica, Roma.

⁽¹⁾ Il progetto 3InSat, co-finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) tramite l'Agenzia Spaziale Europea (ESA, European Space Agency), ha lo scopo di sviluppare e validare il sistema di localizzazione satellitare inclusa la rete di Augmentation conforme al requisito di sicurezza SIL.

⁽²⁾ Il progetto ErSAT, co-finanziato dalla GSA (European Global Navigation Satellite System Agency) (ERTMS SATellite), nasce per raggiungere l'obiettivo finale di una certificazione del sistema ERTMS con la localizzazione satellitare e le TLC wireless.

⁽³⁾ ERTMS/ETCS System Requirements Specification Subset 026 v. 350.

^(*) Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, Università di Catania.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana - Direzione Tecnica, Roma.

⁽¹⁾ The 3InSat project, co-funded by the Italian Space Agency (ASI) through the European Space Agency (ESA, European Space Agency), aims to develop and validate the satellite tracking system including the Augmentation Network fulfilling the requirement, safety SIL.

⁽²⁾ The ERSAT project, co-funded by the GSA (European Global Navigation Satellite System Agency) (ERTMS SATellite), was created to achieve the ultimate goal of the ERTMS certification system with satellite tracking and wireless telecommunications.

⁽³⁾ ERTMS/ETCS System Requirements Specification Subset 026 v.350.

SCIENZA E TECNICA

1. Stato dell'arte nei sistemi di localizzazione del treno e regolamenti

Si fornisce una panoramica delle principali tecniche utilizzate per la localizzazione del treno, con una particolare attenzione ai sistemi ed ai regolamenti.

1.1. Odometria

Le Unità Odometriche (UO) sono le apparecchiature adottate per misurare i percorsi effettuati dal treno. In particolare queste calcolano la progressiva chilometrica, la velocità, l'accelerazione e la direzione di marcia del treno e rilevano la condizione di arresto. Dal punto di vista architettonico l'unità odometrica rappresenta un'unità esterna di controllo, che è dedicata ad effettuare: le misurazioni; la stima di errori; lo scambio di informazioni con l'unità centrale. L'unità centrale è costituita dalla EVC (*European Vital Computer*), SCMT (*Sistema Controllo Marcia Treno*) o RSC (*Ripetizione Segnali Continua*). L'UO è divisa sostanzialmente in due parti costituite da un sensore tachimetrico che fornisce i dati grezzi e dalla logica del processo odometrico, che li elabora e li trasmette all'unità centrale (cioè EVC, SCMT, RSC) [1].

1.2. GPS di alto livello e compensazione RTK

Le applicazioni satellitari GPS verranno utilizzate per migliorare il segnalamento, le comunicazioni, la diagnostica e gli aspetti di sicurezza legati al sistema ferroviario. I seguenti tre sistemi sono stati progressivamente sviluppati:

- EGNOS (Europa): European Geo-stazionaria Navigation Overlay Service;
- WAAS (Stati Uniti): Wide Area Augmentation System[2][3];
- MSAS (Giappone): Multi - functional Transport Satellite Augmentation System [4]. Il sistema basato su rete Ground Based Augmentation System (GBAS) è il sistema GPS con Local Augmentation, cioè, il suo scopo è quello di sostenere con maggiore precisione le operazioni di atterraggio critiche basate su GPS o EGNOS. Esso si articola in due sotto-sistemi: sotto-sistema di terra e sotto-sistema di bordo.

In Italia, esistono diversi sistemi operativi. Il *NetGeo-Topcon* è la rete di stazioni permanenti GNSS realizzata da Geotop: questa è l'unica rete Italiana dotata di tutti i ricevitori GPS + GLONASS, in grado di fornire servizi in tempo reale ed in post-elaborazione. La *Italpos - Leica Geosystems* è una rete cinematica in tempo reale (RTK), cioè una rete di stazioni permanente GPS/GNSS utilizzate per generare le correzioni di un ricevitore mobile (*rover*). Le *SmartNet ItalPoS* sono piccole reti locali in grado di coprire un intero paese.

La singola stazione RTK si basa su due elementi principali, ossia: la stazione di riferimento installata in un

1. State of the art in train positioning systems and regulations

This section provides an overview of the main techniques used for train positioning, with a particular focus on systems and regulations.

1.1. Odometry

The odometry units (hereinafter referred to as OU for short) is the equipment deputy to measure the kinematic train sizes. In particular, it calculates the distance, the speed, the acceleration and the train running direction, and detects the standstill condition. From the architectural point of view the odometry units represents an external central control unit, which is devoted to operate: measurements; estimates and corresponding errors on the parameters of interest; exchange of information with the Central Unit. The Central Unit is the made up of the (European Vital Computer), the SCMT (Sistema Controllo Marcia Treno) or the RSC (Ripetizione Segnali Continua). The OU is divided substantially into two parts constituted by an odometer sensors that provide the raw data and a second part, the "logic of odometry processing", which processes and transmits them to the Central Unit (i.e. EVC, SCMT, RSC)[1].

1.2. High Level GPS and RTK compensation

Satellites GPS applications have been used for improving signalling, communications, diagnostics and safety-critical and safety-related aspects linked to the railway system. The following three systems have been progressively developed:

- EGNOS (Europe): European Geo-stationary Navigation Overlay Service;
- WAAS (the United States): Wide Area Augmentation System[2][3];
- MSAS (Japan): Multi-functional Transport Satellite Augmentation System[4]. The Ground Based Augmentation System (GBAS) is the GPS system for local strengthening, that is, its purpose is to support with higher precision the critical landing operations based upon GPS or EGNOS. It is articulated in two sub-systems: land /ground sub-system and on-board sub-system.

In Italy, different operative systems exist. The NetGeo-Topcon is the GNSS permanent station network realized by Geotop: this is the unique Italian network equipped with all GPS + GLONASS receivers and which is able to provide services in real-time and post-processing. The Italpos - Leica Geosystems is a Real Time Kinematic (RTK) network, that is, a GPS/GNSS permanent station network used for generating the corrections of a rover. The SmartNet ItalPoS are small local networks that can cover an entire country.

The single station RTK relies upon two main elements, namely: the reference station installed in a point having

SCIENZA E TECNICA

punto con coordinate note; dove le correzioni vengono inviate al *rover* mediante un mezzo di comunicazione (cioè un modem radio o una connessione GSM). La rete RTK richiede un minimo di 5 stazioni di riferimento ed un'inter-distanza legata alle stazioni distanti fino a 70 km. Il principio di funzionamento della rete RTK si basa sulla trasmissione delle osservazioni satellitari raccolte dalle diverse stazioni di riferimento al server centrale (server di rete), in cui è installato un software per le reti RTK, cioè la Leica GNSS Spider. L'obiettivo principale delle reti RTK è di minimizzare, il più possibile, l'influenza di errori che dipendono dalla distanza per calcolare la posizione del rover. In particolare, tali GPS ad alto livello permettono di ottenere una maggiore accuratezza per la stima della posizione del treno grazie alle correzioni RTK.

1.3. Altre tecniche

Inoltre, la posizione del treno può essere ottenuta dalle Eurobalise, che sono posizionate in media ogni km, sulla traversa lungo la linea ferroviaria. Grazie al Radio Block Centre (RBC) viene inviato un Position Report (PR) da ogni treno, rispetto alla captazione dell'ultima Eurobalise. Un sistema a basso costo è il ricevitore LDS - OBU, installato a bordo treno, che permette di ottenere una buona stima del posizionamento del treno; ha un inconveniente, la perdita di segnale GPS in caso di gallerie.

2. Un ambiente dedicato per la valutazione di un sistema GPS a basso costo non integrato con EGNOS per la localizzazione del treno

In Europa, l'attuale sviluppo delle tecnologie innovative satellitari per il segnalamento ferroviario si basa sulla piattaforma europea ERTMS-ETCS (*European Railway Traffic Management System / European Train Control System*). In Italia, RFI sta sperimentando sempre più tecnologie satellitari per diversi scopi, come nel caso del progetto 3InSat; includendo anche la possibilità di estendere tali tecnologie per migliorare le ferrovie regionali e locali [5]. L'ERTMS/ETCS è stato progettato per realizzare il controllo della marcia del treno rispetto ai vincoli imposti dall'infrastruttura ferroviaria e dalla circolazione di altri treni. Questo sistema innovativo è stato progettato su scala europea allo scopo di sostituire la variegata serie di sistemi di sicurezza e controllo della circolazione che ora sono presenti nelle diverse ferrovie europee. In particolare, l'ERTMS svolge un ruolo importante per ridurre i costi operativi di gestione, implementazione e di manutenzione, perché viene ridotta la tecnologia installata a terra lungo linea (eliminazione di boe) [6].

Più precisamente, il sistema di localizzazione satellitare di bordo deve determinare la posizione del treno in specifici punti predefiniti della traccia in modo da com-

known coordinates; the corrections sent to the rover by means of a communication mean (i.e. a radio-modem or a GSM connection). The RTK network requests a minimum of 5 reference stations and an inter-distance related to the stations up to 70 km. The functioning principle of the RTK network is based upon the transmission of the satellite observations collected by the different reference stations to the central server (network server), where it is installed a software for RTK networks, namely the Leica GNSS Spider. The main objective of the RTK networks is to minimize, as much as possible, the influence of the errors that depend on the distance for calculating the positioning of the rover. Notably, these high costs GPS systems allow to obtain a greater accuracy for estimating the train position thanks to RTK corrections.

1.3. Other techniques

In addition, the train position can be obtained by Eurobalises, which are placed on the average every km and installed on the crossbar along the railway track. Thanks to the RBC (Radio Block Centre) a position report (PR) from each train is sent with respect to the last Eurobalise captured. Low cost GPS system LDS - OBU (Location Determination System On Board Unit), installed on train board, allows to obtain a good estimation of train positioning; it has a disadvantage of signal loss in case of tunnels.

2. A dedicated environment for the evaluation of a non-integrated with EGNOS and low cost GPS system for localization of the train

In Europe, the current development of innovative satellite technologies for the signalling of railway systems is based upon the European platform ERTMS-ETCS (European Railway Traffic Management System/European Train Control System). In Italy, RFI (Rete Ferroviaria Italiana) has been increasingly adopting satellite technologies for different purposes as in the case of the project 3InSat; also including the opportunity of extending such technologies for improving regional and local railways [5]. The ERTMS/ETCS has been designed for realizing the control of the train route with respect to the constraints imposed by the railway infrastructure and the movement of other trains. This innovative system has been projected on a European-wide scale with the aim of substituting the complex set of security and circulation systems that are currently present for the different European railways. Notably, the ERTMS plays an important role in reducing the operating costs of management, implementation and maintenance, is reduced because the technology installed in the long line ground (removal of balises) [6].

More precisely, the on-board satellite positioning system has to determine the location of the train at specific predefined points of the track so as to compensate the error, in this case is defined RMSE. Moreover, the availability and

SCIENZA E TECNICA

pensare l'errore, che in questo caso è definito come il RMSE. Inoltre, la disponibilità e la continuità del segnale satellitare deve essere integrata con la misurazione puntuale fornita dalle Eurobalise. La certificazione del servizio EGNOS per applicazioni ferroviarie rappresenta un forte incentivo per l'adozione della localizzazione satellitare per i sistemi di gestione in ambito ferroviario. Le motivazioni principali che supportano questo punto sono due. La prima, è che può essere possibile garantire l'interoperabilità dei diversi sistemi di localizzazione installati sul treno che operano sulla stessa linea. Inoltre, essa consente la riduzione dell'investimento iniziale per ottenere la propria rete di augmentation [7].

2.1. L'architettura del sistema

Il progetto ERSAT (ERTMS + SATELLITE), co-finanziato dalla Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA), è stato lanciato al fine di ottenere una certificazione per l'ERTMS e le telecomunicazioni (wireless) [8]. Tale progetto rappresenta un'opportunità stimolante per collegare EGNOS e ERTMS e per certificare un sistema che rispetta le norme CENELEC (EN 50126 - RAMS, EN 50129, etc.). La fig. 1 riporta l'architettura del sito prova in Sardegna [9]. Cinque sono gli elementi meritevoli di nota:

- 1) la linea ferroviaria: Cagliari - S. Gavino, che è di circa 50 km;
- 2) due stazioni di riferimento locali (LRS 1 e LRS 2), che si trovano nelle stazioni ferroviarie di Samassi e Decimomannu [10];
- 3) l'algoritmo TALS (*Track Augmentation Local Server*), disponibile su una piattaforma PC, che si trova nel posto centrale di controllo della stazione ferroviaria di Cagliari;
- 4) la comunicazione tra TALS e LRSs, che utilizza RFI SDH;
- 5) la rete di comunicazione radio.

Si noti, inoltre, che il TALS deve essere collegato via Ethernet Link alla radio di comunicazione di una rete pubblica per mezzo di una vera e propria TLC Gateway.

2.2. La metodologia di valutazione sviluppata e gli strumenti

Per valutare e confrontare le prestazioni della localizzazione del treno eseguita con un ricevitore GPS a basso costo, LDS-OBu, con quella ottenuta da un ricevitore RTK che include le correzioni RTK, è stato sviluppato un approccio specifico (fig. 2). Le correzioni RTK sono state fornite dalle stazioni di riferimento posizionate lungo il sito di prova in Sardegna; i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ottenuti da studi analoghi condotti da Ansaldo STS [11].

the continuity of the satellite positioning observations have to be integrated with the punctual measurement provided by the Eurobalises. The certification of the EGNOS service for railway applications represents a strong incentive for adopting the satellite localization to the managing systems in the railway environment. Two main motivations support this view. Firstly, it can be possible to guarantee the interoperability of different systems of localization installed on the rolling material operating in the same line. Secondly, it allows for the reduction of the initial investment operated by the system administrator in order to obtain the own augmentation network [7].

2.1. The system architecture

The ERSAT project (ERTms over SATellite), co-funded Global Navigation Satellite Systems Agency (GSA), has been launched in order to obtain a certification for the ERTMS and the TLC (wireless) [8]. Such project represents a stimulating opportunity for connecting the EGNOS and the ERTMS, and certifying a system that respect the CENELEC (EN 50126 - RAMS, EN 50129, etc.) standards. Fig. 1 reports the Sardinia Trial Site Skeleton Architecture [9]. The following five elements are worth observing:

- 1) *the Railway Line: Cagliari – S. Gavino that is about 50 km long;*
- 2) *two Local Reference Stations (LRS 1 and LRS 2) that are located in the railway stations of Samassi and Decimomannu [10];*
- 3) *the TALS (Track Augmentation Local Server) algorithm that is available on a PC platform and it is located in the Cagliari's Railway station control center;*
- 4) *the communication between TALS and LRSs using RFI SDH;*
- 5) *the Radio Communication Network.*

Note that, moreover, the TALS has to be connected via Ethernet Link to the Radio Communication Public Network by means of a proper TLC Gateway.

2.2. The developed assessment methodology and the tools

To evaluate and compare the performance of the train positioning performed with a low cost GPS receiver with the train positioning obtained from a RTK receiver that includes the RTK corrections, a specific procedure (fig. 2) has been developed. The RTK corrections have been provided by the Reference Stations positioned along the Sardinia trial site; the results of the have been then compared with those obtained by similar studies conducted by Ansaldo STS [11].

In this work, the following RTK networks, has been used: i) NetGEO (TOPCON); ii) ItalPos (Leica Geosystem). Specifically, the RTK stations that have been used are:

SCIENZA E TECNICA

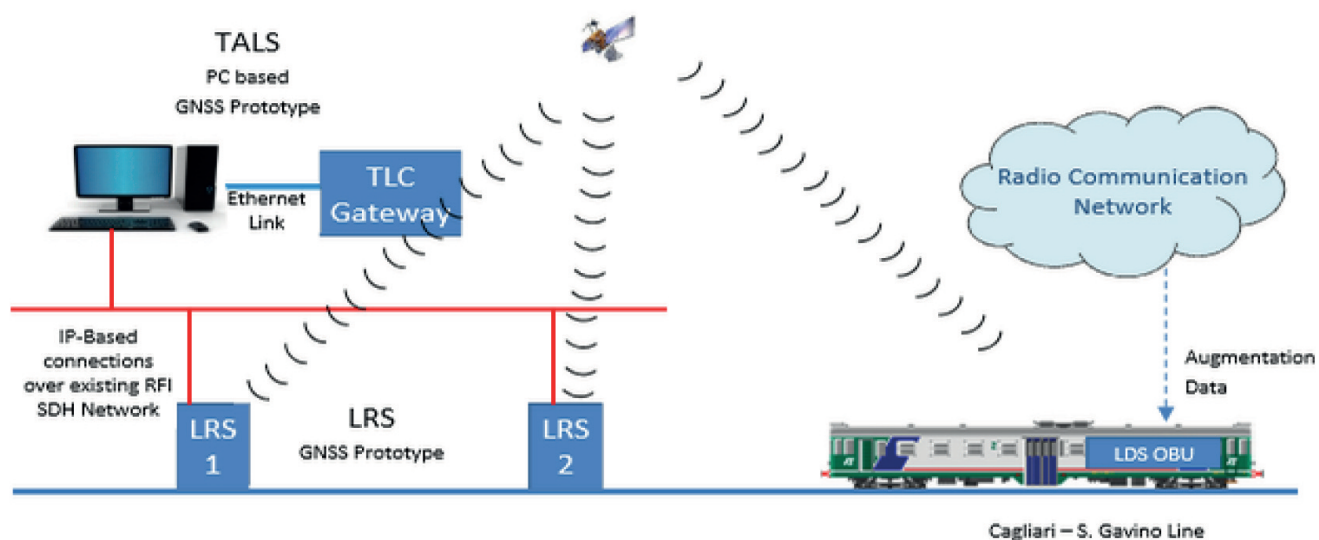


Fig. 1 - Architettura sito prova Sardegna.
Fig. 1 - Sardinia Trail Site Skeleton Architecture.

In questo lavoro, sono state utilizzate le seguenti reti RTK: i) NetGEO (TOPCON); ii) ItalPos (Leica Geosystem). In particolare, le stazioni RTK utilizzate sono state:

- ItalPos Stazione RTK - Cagliari (solo GPS);
- Arbus (solo GPS) - Senorbi (solo GPS);
- NetGeo Stazione RTK: Sanluri, Soleminis.

I dati RTK sono stati scaricati in formato Rinx ed il Ground Truth è stato sviluppato utilizzando una post-elaborazione off-line. I dati sono stati memorizzati su un file in formato binario e convertiti off-line in formato testuale utilizzando il tool proprietario "Septentrio Converter".

Come primo passo, i dati ottenuti dal ricevitore GPS - 'Septentrio' AsteRx 3[12] - sono stati raccolti in formato SBF (cioè *Formato Binario Septentrio*). Poi, questi dati sono stati convertiti nel formato *RINEX*, cioè, il formato standard, utilizzando uno specifico tool di conversione proprietario, cioè il *convertitore SBF*. Il passo successivo è stato quello di scaricare le correzioni RTK dalle stazioni di Arbus da applicare alle rispettive osservazioni GPS. Per questa analisi, è stato utilizzato il software *open source RTKLib*. Il Ground Truth è stato considerato come dato corretto o di riferimento. Successivamente è stata effettuata una conversione in coordinate piane, tramite *Matlab*®, ottenuta utilizzando le informazioni dei dati relativi alla latitudine, longitudine e altitudine. Questo permette di passare dalle coordinate geografiche alle coordinate piane: pertanto, è stato possibile utilizzare i dati in ambiente *Matlab*® mediante l'utilizzo del tool di conversione di dati.

Infine, è stato calcolato un indice di performance basato sull'errore quadratico medio (RMSE) al fine di confrontare il Ground Truth (*il riferimento*) con i dati otte-

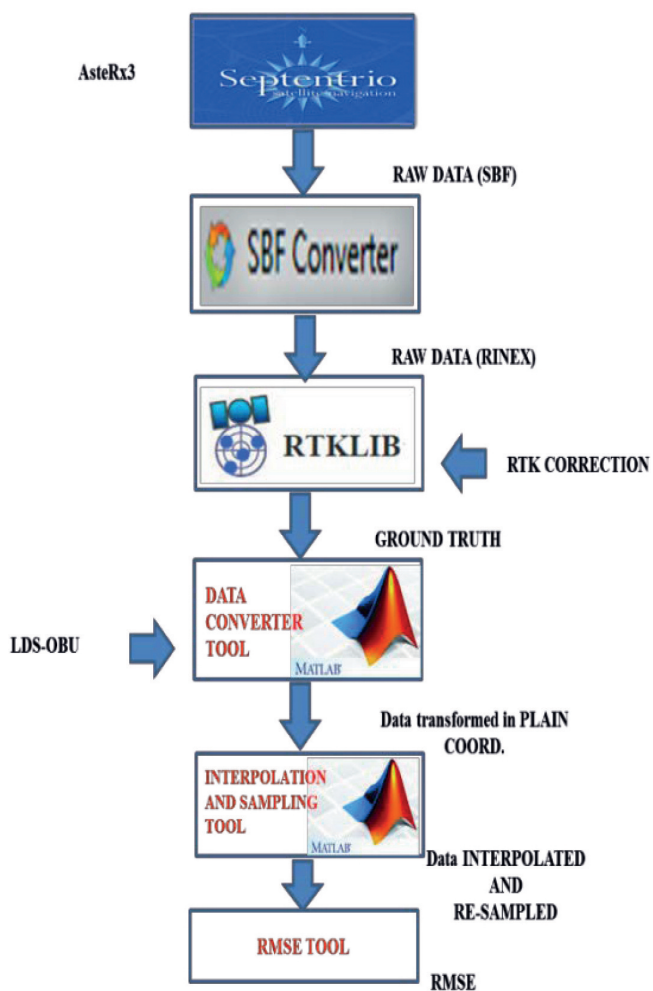


Fig. 2 - Diagramma di flusso.
Fig. 2 - Flow diagram.

SCIENZA E TECNICA

nuti dal ricevitore LDS-OBU. Interessante notare che, quest'ultimo risulta essere un ricevitore GPS che mostra qualità inferiori rispetto al Septentrio. L'elaborazione dei dati è stata fatta dopo l'interpolazione ed il ricampionamento dei dati, in modo da ottenere dei vettori con lo stesso numero di elementi: sono stati utilizzati Interpolation and Re-sampling Tool. Infine, il calcolo dell'indice di performance è stato ottenuto dal RMSE tool.

2.3. Trasformazione dati da SBF a RINEX

La trasformazione dei dati dal formato binario Septentrio al formato RINEX è obbligatorio, al fine di studiare ed analizzare i dati. Tale trasformazione è stata eseguita utilizzando il tool *Septentrio SBF Converter*.

2.4. Post-elaborazione con RTKlib

A partire dal dato grezzo GNSS, è possibile eseguire un'analisi in tempo reale ed in post-elaborazione, al fine di determinare la localizzazione ad alta precisione. Con l'adozione di ricevitori ed antenne professionali di alta qualità può essere raggiunta un'elevata accuratezza (del centimetro). In questo caso, RTKlib è stato utilizzato in post-elaborazione per correggere il segnale fornito dal Septentrio mediante correzioni RTK. Di conseguenza, l'immagine della traiettoria può essere direttamente visualizzata.

2.5. Generazione del Ground-Truth

Il Ground Truth è stato ottenuto attraverso una post-elaborazione *off-line* [13]. Più precisamente, è stato calcolato utilizzando il software RTKlib come discusso nella sezione precedente. Inoltre è stato aggiunto un offset per tener conto della distanza tra la posizione delle due antenne (fig. 3) con i vettori a e b.

Per confrontare i dati ottenuti dai due ricevitori, è stato attivato un processo di trasformazione utilizzando un algoritmo in MATLAB, in particolare sfruttando la specifica funzione 'lla2flat'. I dati importati sono stati organizzati in 15 colonne che riportavano alcune informazioni, come il tempo (l'ora), la data, la latitudine, la longitudine, l'altitudine, il numero di satelliti visibili, e le diverse deviazioni standard. Solo le informazioni relative alla latitudine, longitudine ed altitudine sono state prese in considerazione come richiesto dal processo di trasformazione dati.

2.6. Interpolazione e ricampionamento dati

Ai fini del confronto, i dati del Ground Truth e quelli del LDS-OBU devono avere lo stesso numero di campioni. Per questo motivo è stato necessario interpolare e ricampionare i dati. Tale compito è stato cruciale per poi

- ItalPos RTK Stations - Cagliari (GPS only);*
- Arbus (GPS only) - Senorbi (GPS only);*
- NetGeo RTK Stations: Sanluri, Soleminis.*

The RTK Data are downloaded in the RINEX Format and the Ground Truth has been developed by using the off-line post-processing. The data have been stored onto binary format files and off-line converted in textual format files by using proprietary conversion tools "Septentrio Converter".

As a first step, the data obtained from the GPS receiver – 'Septentrio' AsteRx3 [12] – having the SBF format (i.e. Septentrio Binary Format) have been collected. Then, such data have been converted in the RINEX format, that is, the standard format, by using the specific tool of conversion, namely the SBF Converter. The next step has been to download the RTK corrections from the Arbus' stations in order to apply such corrections to the GPS observations. To this end, the open source software 'RTKLib' has been employed. The Ground Truth has been considered like the correct data. The subsequent conversion to plain coordinates has been achieved by using the data information related to latitude, longitude, and altitude. This has allowed us to switch from geographical data to plain coordinates' observations: therefore, it has been possible to use the data by adopting the Matlab® software by means of the Data Converter Tool.

Subsequently, a performance index based on the Root Mean Squared Error (RMSE) has been calculated in order to compare the Ground Truth and the LDS-OBU. Noteworthy, the latter results to be a GPS receiver showing lower quality with respect to the Septentrio receiver.

Data elaboration has been performed after the interpolation and re-sampling of data in order to obtain vectors with the same number of elements: an Interpolation and Re-sampling Tool has been used. Finally, the calculation of the performance index has been obtained by using the RMSE Tool.

2.3. Data transformation from SBF to RINEX

The transformation of the data from the Septentrio Binary Format to the RINEX format results important in order to study and analyse the observations. Such transformation has been performed by using the Septentrio SBF Converter tool. Observe that, this tool is quite easy to use and shows the following aspects:

- data have to be selected;*
- different files can be converted at the same time;*
- the desired format of conversion has to be chosen;*
- the transformation procedure is subsequently started.*

2.4. Post-elaboration with RTKlib

RTKLIB is an open source GNSS toolkit for performing standard and precise positioning. Starting from GNSS raw

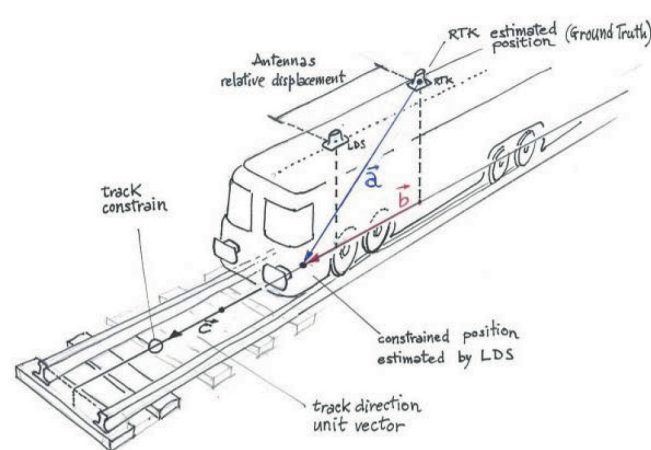


Fig. 3 - Rappresentazione grafica, precisione treno.
Fig. 3 - Train position accuracy, graphical representation.

calcolare il RMSE tra il Ground Truth (GT) ed il LDS-OBU. È stata eseguita una successiva elaborazione dei dati. In primo luogo, sono state considerate le coordinate (x,y) dei due vettori (GT ed LDS-OBU) ottenuti dalla precedente trasformazione: è stata adottata un'approssimazione (al centimetro) per ottenere una migliore precisione. Successivamente i dati sono stati interpolati e ricampionati. Avendo un percorso definito di 50 km è stato possibile manipolare i dati, infatti l'asse x è stato uniformato considerando la media dei valori minimi e massimi dei due vettori in modo da lavorare solo con l'asse y.

2.7. Calcolo dell'indice di prestazione

L'indice è rappresentato dal RMSE delle distanze d_{ij} tra i punti del Ground Truth ed LDS – OBU; in particolare sono state prese in considerazione tre corse prova. Consideriamo, il seguente esempio illustrato in fig. 4. Dati due punti A_i ed A_{i+n} della traiettoria 1 (in colore rosso) mostrando la distanza di circa 26 m (lunghezza della carrozza del treno) è stata calcolata la retta r passante tra questi due punti. Poi, è stata calcolata la retta t ortogonale ad r e passante per il punto medio M del segmento definito da A_i ed A_{i+n} , che risulta essere d_{ij} ovvero la lunghezza del segmento $\overline{MB_j}$ dove B_j è il punto di intersezione tra la retta t passante per il punto medio M e la traiettoria 2 (in colore blu). Formalmente, abbiamo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i,j=1}^n d_{ij}^2}{n}},$$

in cui:

- r è la retta passante per A_i ed A_{i+n} ;
- B_j è il punto di intersezione tra la retta t passante per il punto medio M e la traiettoria 2;

data, it allows us to perform real-time and post-processing tasks in order to determine the positioning with high precision. By adopting high-quality professional receivers and antennas, high (centimetre) accuracy can be achieved. In this case, the RTKlib has been used in post-processing for correcting the signal provided by the Septentrio by means of the RTK data obtained from the Reference Stations and the path of the Rinex Navigation messages files of GPS (i.e. Rinex NAV) have been selected in order to obtain the output having the desired solution. Therefore, the image of the trajectory can be directly visualized.

2.5. Ground-Truth generation

The Ground Truth has been obtained through off-line post-processing [13]. More precisely, it has been calculated by using the RTKlib software as discussed in the previous section. An offset has been added to take into account the distance between the positioning of the two antennas with a and b vectors (fig. 3).

To study the data obtained from the two receivers and compare them, a data transformation process has been operated by using an algorithm in MATLAB having the specific function 'lla2flat': in this way, it has been possible to have the transformation of interest. Imported data were organized in 15 columns reporting information such as time (hour), date, latitude, longitude, altitude, n. of visible satellites, different standard deviations. Only information related to latitude, longitude and altitude have been considered as requested by the data transformation process.

2.6. Data interpolating and re-sampling

To work with the data, we need to have the same number of points, and therefore, we have to obtain the same dimension of the vector. This aspect requires that data have to be interpolated and re-sampled in order to obtain the same length of the vectors. Such task is crucial for subsequently calculating the RMSE between the Ground Truth and the LDS-OBU observations. Specifically, the following activities have been conducted. Firstly, the coordinates (x,y) of the two vectors (GT and LDS-OBU) obtained from the transformation have been considered: an approximation (of centimeters) has been adopted in order to achieve a better precision. Secondly, the most complex part of the algorithm, namely the linear interpolation and re-sampling, has been performed. The x-axis has been uniformed by averaging the minimum and maximum values of the two vectors so as to work with the y-axis. We have created vectors initially showing NaN that will subsequently represent the re-interpolated vectors. By using the cycles 'for', it has been possible to truncate the data and interpolating them. As a consequence, we have obtained two vectors having the same length. More precisely, the following algorithm has been applied.

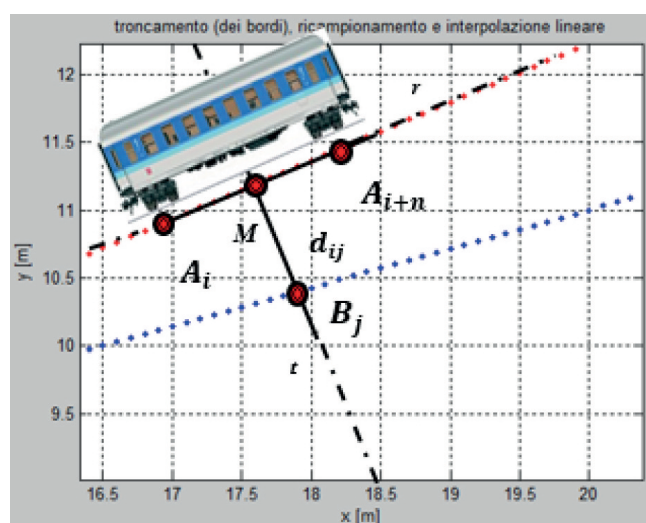


Fig. 4 - Esempio di calcolo RMSE.

Fig. 4 - RMSE calculation, example.

- d_{ij} è la lunghezza del segmento $\overline{MB_j}$;
- n è il numero di punti che sono stati considerati.

3. Caso studio: confronto tra i dati sperimentali per le diverse metodologie utilizzate (da Ansaldo per RFI ed il Laboratorio di Sensori CT)

3.1. Descrizione del sito

Il sito di prova è stato localizzato in una linea a doppio binario di circa 50 km tra 'Cagliari e San Gavino', questa scelta è stata motivata dal fatto che questa è l'unica tratta ferroviaria a doppio binario in Sardegna, che consentiva quindi l'esecuzione congiunta di prova e di viaggi commerciali, dove i controlli del movimento del treno sono state realizzate in combinazione con lo sviluppo di tecnologie satellitari e TLC basati su reti pubbliche.

La linea ferroviaria di prova è stata scelta, inoltre, con l'obiettivo di validare e certificare EGNOS e Galileo per le applicazioni di sicurezza per il sistema ferroviario. Questo sito di prova è il primo in Europa per questo tipo di sperimentazioni, e ci si aspetta che sia particolarmente adatto e rappresentativo delle linee ferroviarie locali a bassa densità di traffico - che rappresentano circa il 50% delle linee ferroviarie europee totali. La fig. 5 illustra la localizzazione del sito di prova in Sardegna nonché le sue diverse fasi strategiche [14].

In particolare, il sito prova è caratterizzato dai seguenti elementi. Un treno dotato di piattaforma ERTMS che contribuisce ad integrare il posizionamento via satellite con TLC wireless. A livello della terra, sono stati installati il Radio Block Centre (RBC) ed i tools di configurazione previsti dallo standard ERTMS. Da notare, la localizzazione satellitare e le reti ibride TLC (cioè GSM /

2.7. Calculation of performance level

The performance index is represented by the RMSE (Root-mean-square deviation) of the distances d_{ij} between the points of the two trajectories. Let's consider, for instance, the following illustrative example shown in fig. 4. Given two points A_i and A_{i+n} of the trajectory 1 (in red color) showing distance of about 26 m – this distance represents the length of a train coach – we can calculate the straight line r passing from such points. Then, if we consider the straight line t that is orthogonal to r and that passes across the average point M of the segment defined by A_i and A_{i+n} it results that d_{ij} is the length of the segment $\overline{MB_j}$ where B_j is the intersection point between t passing from M and the trajectory 2 (blue color). More formally, we have:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i,j=1}^n d_{ij}^2}{n}},$$

with:

- r is the straight line passing from A_i and A_{i+n} ;
- B_j is the intersection point between t passing from the point M and the trajectory 2;
- d_{ij} is the length of the segment $\overline{MB_j}$;
- n is the number for points that are taken into account.

In our case, a straight line of 26 meters – that is equal to the length of the train coach – has been taken into consideration. The RMSE has been calculated as follows. From the data obtained after the linear interpolation and re-sampling, and after taking into account the length of the train coach, the angular coefficient passing from two points has been calculated. By considering the average point $p(x,y)$ of the straight line – that is referred to the train coach – the perpendicular line to this point has been calculated in order to determine the distance with the other trajectory. Specifically, the following MATLAB algorithm has been developed.

3. Case study: comparison of experimental data for the different methodologies used (by Ansaldo for RFI and the Sensors Laboratory CT)

3.1. Site description

The trial site has been located in a double track of about 50 km between 'Cagliari and San Gavino' – this choice has been motivated by the fact that this is the only double track railway in Sardinia allowing for the joint execution of trial and normal trips - where the controls of the railway system motion have been realized in combination with the development of satellite positioning technologies and TLC based on public networks.

The railway trial line has been realized, moreover, with the aim of validating and certifying the EGNOS and the

SCIENZA E TECNICA

The Sardinia Test Site in the programme roadmap

50 km The Test Site: Cagliari – S.Gavino



Phase 1: 3InSat (satellite assets validation)

- Total length: approximately 50 km
- Double track: to test train localization on parallel tracks
- Satellite localization system at SIL-4 level
- Multi-bearer TLC network
- Augmentation network validation
- Test Procedures validation
- Independent assessment by a NoBo (Italcertifier)

Phase 2: ERSAT (ERTMS on Satellite)

- deployment of an ERTMS-ETCS system
- integration of satellite localization SIL-4
- integration of a multi-bearer TLC network
- EGNOS "adaptation"
- fixed block (L2) train separation
- Moving block (L3)
- Certification

Fig. 5 - Localizzazione e configurazione del sito prova.

Fig. 5 - Localization and configuration of the trial site in Sardinia.

3G e-satellite based) sono le principali innovazioni di questo sistema rispetto alle applicazioni ERTMS esistenti per le infrastrutture ferroviarie. Inoltre, il sito prova consente di validare i blocchi fondamentali della tecnologia satellitare, e cioè: il dispositivo di localizzazione, la rete di augmentation ed il sistema TLC che viene utilizzato in alternativa al GSM-R per l'integrazione con il sistema ERTMS. La fig. 6 descrive l'architettura e gli elementi principali del sito di prova [13].

Il progetto è stato articolato in diverse fasi. Nella prima fase, l'obiettivo principale è stato quello di studiare ed analizzare le soluzioni esistenti (stato dell'arte) che sono state applicate in questo campo ed i loro aspetti critici per applicazioni ferroviarie. Nella seconda fase sono state svolte le seguenti attività: definizione del progetto, sviluppo, realizzazione, collaudo e validazione, valutazione dei risultati. Per quanto riguarda gli obiettivi strategici del sito di prova, possiamo ricordare la validazione del sistema GNSS per valutare la sua applicazione e l'adeguatezza agli standard ferroviari: oggi, EGNOS è ampiamente adottato per scopi di aviazione, ma non è stato ancora introdotto nel settore ferroviario. Il sito di prova in Sardegna aiuterà lo sviluppo delle seguenti linee guida:

- georeferenziazione della linea;
- sopralluogo per le misure di compatibilità elettromagnetiche.

3.2. Dettagli di equipaggiamento

Il progetto è stato effettuato utilizzando l'automotrice diesel ALn668-3114, che è stata equipaggiata con LDS – OBU, e RTK Reference. In aggiunta, ci sono apparec-

Galileo architectures for the applications to the security aspects of the railway system. This test site is the first in Europe for this kind of operations and it is expected to be particularly informative and relevant for local railway lines showing low traffic intensity – which represent about 50% of total European railway lines. Fig. 5 illustrates the localization of the trial site in Sardinia as well as its different strategic phases [14].

In particular, the test site is characterized by the following elements. A train equipped with the ERTMS platform that contributes to integrating the satellite positioning with the TLC wireless. At ground level, a Radio Block Centre (RBC) and the tools for operating the full configuration requested by the ERTMS standard have been installed. Noteworthy, the satellite positioning and the TLC hybrid networks

(i.e. GSM/3G and satellite-based) are the main innovations of this system with respect to the existing ERTMS applications for railway infrastructures. In addition, the test site allows for the validation of the fundamental blocks of the satellite technology, namely: the positioning device, the augmentation network, and the TLC-based system that is used in alternative to the GSM-R (i.e. Global System Mobile-Railway) for the integration with the ERTMS system. Fig. 6 describes the architecture and main elements of the test site discussed beforehand [13].

The project has been articulated in different phases. In the first phase, the main objective has been to study and analyse the existing solutions (i.e. 'state of the art') that have been applied to this field and their critical aspects for railway applications. Then, in the second phase, the following activities have been carried out: project definition, development, realization, testing and validation, evaluation of the results.

As for the strategic objectives of the trial site, we can remember the validation of the EGNOS system for evaluating its application and appropriateness to the railway standards: today, the EGNOS is widely adopted for aviation purposes, but it has not been yet introduced in the railway sector. The Sardinia Trial Site will help the development of the following guidelines:

- Track Survey;
- EMC Survey for the Reference Station Installations.

3.2. Equipment details (low cost GPS, reference GPS)

The project has been carried out by using the train 'ALn668 – 3114', which has been equipped with the on-

SCIENZA E TECNICA

ottenuto da RFI è sul lato sinistro, mentre i risultati dal metodo proposto attraverso questo documento (presso il Laboratorio di Sensori dell'Università di Catania - SL) sono mostrati sul lato destro.

Per quanto riguarda la corsa prova 194 (fig. 7), si può osservare che il RMSE considerato da Ansaldo per RFI, con metodologie diverse è di 2,45 m, mentre per l'approccio proposto risulta essere circa 2,96 m. Il risultato ottenuto per la corsa prova 195 è riportato nella fig. 8.

In questo caso, il RMSE risulta essere circa 1,65 m per l'applicazione di RFI, mentre per il calcolo effettuato dal SL è di circa 1,73 m. I risultati ottenuti per la corsa prova n. 200 sono mostrati in fig. 9.

Per quanto riguarda la corsa prova n.200, il RMSE risulta essere circa 1,91 m per l'applicazione considerata da RFI, mentre per l'approccio utilizzato dal SL risulta essere circa 2,13 m.

3.4. Risultati (RMSE, MIN, MAX, MEDIA, STD, ISTOGRAMMA)

La seguente tabella illustra i principali risultati dell'applicazione.

La tabella 1 riporta i valori di RMSE, il minimo ed il massimo valore, la deviazione standard, e l'errore medio rispetto alle tre corse prova 194, 195, 200.

La fig. 10 riporta i tre istogrammi che mostrano la deviazione standard, dove viene riportato sull'asse x le distanze e sull'asse y le frequenze.

Tre sono i principali commenti, che vale la pena esporre. Primo, il confronto tra le elaborazioni condotte

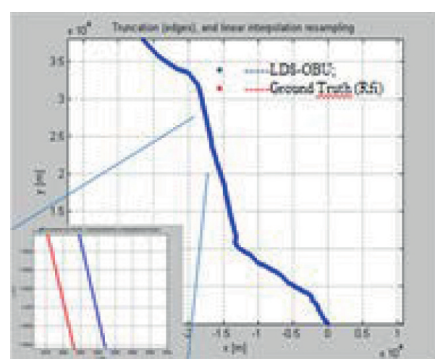


Fig. 9 - Confronto tra LDS-OBU and Ground Truth corsa prova n. 200.

Fig. 9 - LDS-OBU and Ground Truth comparison, train trip n. 200.

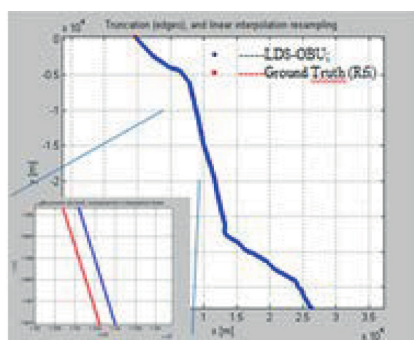


Fig. 7 - Confronto tra LDS-OBU and Ground Truth corsa prova n. 194.

Fig. 7 - LDS-OBU and Ground Truth comparison, train trip n. 194.

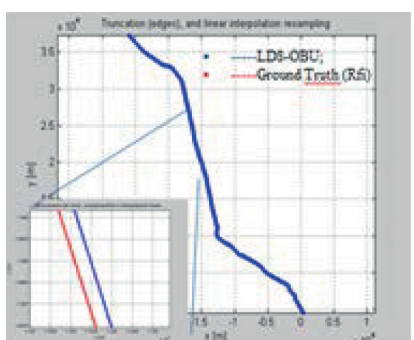


Fig. 8 - Confronto tra LDS-OBU and Ground Truth corsa prova n. 195.

Fig. 8 - LDS-OBU and Ground Truth comparison, train trip n. 195.

3.4 Results (RMSE, MIN, MAX, Average, STD, HISTOGRAM)

The following graphs illustrate the main results of our work. Table 1 reports the RMSE, the minimum and the maximum values, the standard deviation, and the medium error with respect to the three train trips 194, 195, 200.

Fig. 10 reports the three histograms showing the standard deviation, as reported the distance on the axis x and the frequency on the axis y.

Three main comments are worth discussing. Firstly, the comparison of the elaborations conducted at the Sensor Lab with those operated by RFI has supported the validity of the technique that we have applied: the average precision position per train trip is always lower than 3 meters coherently by railway standards. Secondly, the application of different approaches (RFI and Sensor Lab) to the same issue has produced similar results, which are quite satisfactory for future applications. Thirdly, our results have further justified the potential advantages of the application of satellite positioning systems to the railway sector, that is,

SCIENZA E TECNICA

dal SL con quelle gestite da RFI ha sostenuto la validità della tecnica applicata: la precisione media della posizione delle corse prova è sempre inferiore ai tre metri, in linea con gli standard ferroviari. Secondo, l'applicazione dei diversi approcci (RFI e SL) ha prodotto risultati simili, che sono abbastanza soddisfacenti per applicazioni future. Terzo, i nostri risultati giustificano l'applicazione per la localizzazione in ambiente ferroviario, cioè la localizzazione satellitare può contribuire con la riduzione dei costi di gestione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie ed aumentare la capacità di trasporto; dato che la distanza tra i treni può essere dinamicamente gestita dal RBC in funzione del reale traffico ferroviario e l'introduzione dell'ERTMS L3 (Blocco mobile + Train Integrity).

4. Conclusioni e sviluppi futuri

Il principale obiettivo di questa ricerca è stato quello di sviluppare un ambiente per processare i dati provenienti dal GPS per l'applicazione della localizzazione satellitare in ambiente ferroviario. Per valutare la procedura sviluppata, i risultati ottenuti dal Laboratorio di Sensori – il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Elettrica Elettronica ed Informatica (DIEEI) sono stati confrontati con quelli ottenuti da RFI ed Ansaldo STS. La specifica metodologia è stata utilizzata per tentare una prima risposta alla domanda se un sistema GPS a basso costo può essere utilizzato per ottenere misurazioni affidabili di localizzazione del treno.

I risultati ottenuti sono incoraggianti, saranno sviluppati ulteriori soluzioni per valutare e migliorare la metodologia proposta. Al fine di sostenere la concreta applicazione della tecnica proposta sono necessari ulteriori confronti.

RMSE, Min, Max, Media, STD

TABELLA 1 – TABLE 1

TRACE	194	195	200
J_{RMSE} (GT_SL, LDS)	2.96 m	1.73 m	2.15 m
J_{MAX} (GT_SL, LDS)	8.14 m	10.11 m	21.89 m
J_{MIN} (GT_SL, LDS)	0.03 m	0.03 m	0.0007 m
STANDARD DEVIATION	0.99 m	1.70 m	1.52 m
MEDIUM ERROR	2.80 m	2.51 m	1.51 m

the satellite positioning can contribute to reduce the costs of managing and maintenance of railway infrastructures and increase the transport capacity; given that the distance between different trains can be dynamically operated according to the traffic and context-dependent aspects.

4. Conclusions and future works

The main objective of this research has been to compare the results obtained at the Sensor Laboratory – the research group at the Department of Electrical, Electronic and Informatic Engineering (DIEEI) at University of Catania – with those deriving from the analyses conducted by RFI and Ansaldo STS. The research-specific methodology has been used for answering the question whether a low cost GPS system can be used for obtaining reliable train positioning measurements. The results have confirmed the validity of our work: the average precision position per train trip is always lower than 3 meters in line with railway standards.

Some additional questions need to be investigated. Further comparisons are required in order to support the con-

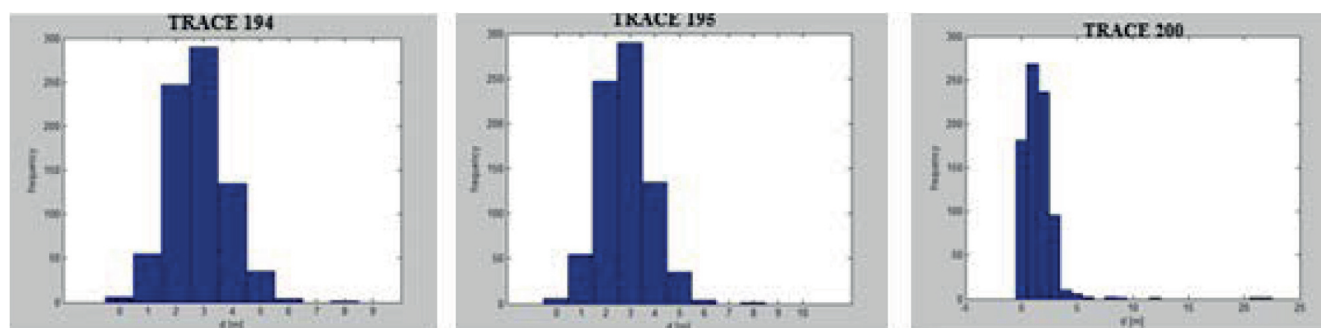


Fig. 10 - Istogrammi.
Fig. 10 - Histograms.

SCIENZA E TECNICA

L'indagine dei diversi approcci, cioè di RFI e SL, dovrebbe essere condotta tenendo in considerazione altri aspetti, come l'ambiente delle sperimentazioni condotte e l'architettura della metodologia.

Inoltre, altri elementi della tecnica proposta devono essere tenuti in considerazione come i costi di sviluppo e implementazione. Queste e altre domande sono lasciate per la ricerca futura.

crete application of the proposed technique. The investigation of the different approaches, namely RFI and Sensor Lab, should be conducted by taking into consideration other aspects such as the environment of the projects that have been used and the architecture of the methodology. In addition, further elements of the proposed technique like implementation costs and practical issues need to be grasped. These and other questions are left for future research.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Rete Ferroviaria Italiana (2012), *"Specifica dei requisiti di SSB AV"*, Volume 3, Sottosistema di Bordo – Blocco funzionale Odometria, Roma.
- [2] LOH R., WULLSCHLEGER V., ELROD B., LAGE M., HAAS F. (1995), *"The US Wide Area Augmentation System (WAAS)"*, Navigation, 42(3), 435-465.
- [3] WALTER T., ENGE P., REDDAN P. (2004, September), *"Modernizing WAAS"*, in Proceedings of ION GNSS 2004 (pp. 21-24).
- [4] SHIMAMURA A. (1999), *"MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system) project status"*, Air & Space Europe, 1(2), 63-67.
- [5] SENESI F., CIAFFI M., CARONTI D. (2013), *"ERTMS via satellite: la linea pilota italiana"*, La Tecnica Professionale, 6, 1-14.
- [6] SENESI F., MALANGONE R. (2007), *"Formal Method Analysis and Evaluation of ERTMS Test Specification for the Italian High-Speed Railway"*, in (eds. E. SCHNIEDER, G. TARNAI), Proceedings of the 6th FORMS/FORMAT Symposium, Braunschweig, Germany, pp. 97-106.
- [7] LISI M. (2012), *"EGNOS and Galileo: the European Integrated Approach to the Provision of PNT Services"*, ESTEL Conference Proceedings, Rome.
- [8] *Protocollo di Intesa Regione Sardegna ASI Sviluppo Tecnologie Innovative per la Circolazione Ferroviaria*, January, 24, 2013.
- [9] Ansaldo STS (2014), *"3InSat: Sardinia Trial Site Architecture Specification"*, Technical Report, Genoa.
- [10] Marzoni M.G., Lippi A., Rispoli F., Senesi F. (2014), *"Applicazione satellitare alla localizzazione treno nel comando-controllo e segnalamento"*, Rome.
- [11] Ansaldo STS (2015b), *"Satellite Assisted Railway Applications: Sardinia Trial Site – Log Analysis – Train Runs on June 09th 2015"*, Technical Report, Genoa.
- [12] www.septentrio.com
- [13] Ansaldo STS (2015a), *"3InSat: DemUp - Demo Utilization Plan"*, Technical Report, Genoa.
- [14] SENESI F., (2012), *"Satellite application for train control systems: The test site in Sardinia"*, Journal of Rail Transport Planning & Management, 2, 73-78.

SCIENZA E TECNICA

Sommaire

MÉTHODOLOGIE POUR LA PHASE DE TEST D'UN SYSTÈME GPS POUR LA LOCALISATION DES TRAINS

Cet article porte sur l'application de la technologie satellitaire au secteur ferroviaire, ou celle-là pourrait avoir un rôle stratégique pour la signalisation, les communications, le diagnostic et la sécurité. L'objectif a été la réalisation d'observations satellitaires grâce à un GPS à bas coût, qui ont été par la suite évaluées et comparées aux données du récepteur RTK obtenues dans le cadre des projets 3inSat et ERSAT. Ces projets ont été récemment démarrés par Ansaldo STS, "Rete Ferroviaria Italiana" (RFI) et l'université de Catane. L'acceptabilité du travail a été soutenue par le fait que la précision moyenne de la localisation du train à toujours été inférieure aux 3m, en ligne avec les standards ferroviaires.

Zusammenfassung

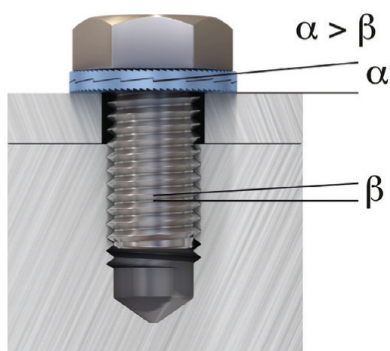
EXPERIMENTIERUNG VON GPS VERFAHREN EINES GPS-SYSTEM FÜR DIE ZUGORTUNG

Das Verfassungsziel ist die Verwendung der Satellitären Technik in dem Bahn Sektor, wo diese vorteilhaft benutzt werden kann, z.B. in Felder wie Signal Technik, Diagnostik us.w. Es wurde eine Serie von Vergleichen zwischen Beobachtungen, aus einem billigen GPS System gewonnen, und Beobachtungen aus einem RTK Gewonnen in Rahmen der Projekten 3inSat und ERSAT. Als Meßort wurde Sardinien gewählt wo Experimente über ERTMS/ETCS geführt werden können. Forschungsteilnehmer waren Ansaldo STS, RFI und Universität Catania. Das Vergleichsverfahren erlaubt die Berechnung eines Index das feststellt, ob die Stellung des Zuges mit einem Fehler größer oder kleiner von 3m gemessen würde.

NORD-LOCK®

Bolt securing systems

- Previene lo svitamento causato da vibrazioni e carichi dinamici
- La funzione bloccante non è influenzata dalla lubrificazione
- Non necessita di utensili speciali
- Riutilizzabile



Dato che l'angolo delle camme 'α' è maggiore rispetto all'angolo del passo del filetto 'β', la coppia di rondelle, espandendosi di più rispetto al passo del filetto, aumenta la tensione prevenendo lo svitamento.

Nord-Lock S.r.l.
 Tel: +39 011 34 99 668 • Fax: +39 011 34 99 543
 Email: info@nord-lock.it • Web: www.nord-lock.it